

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
6 mai 2004 (06.05.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
WO 2004/038730 A1

(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> :  
G21C 17/00, G21D 3/00

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2003/003016

(22) Date de dépôt international :  
13 octobre 2003 (13.10.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
0213093 21 octobre 2002 (21.10.2002) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : FRAM-  
ATOME ANP [FR/FR]; Tour Areva, 1 Place de la Coupole,  
F-92400 COURBEVOIE (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : MAHE,  
Patrice [FR/FR]; 11 Impasse Turquoise, F-69360 TER-  
NAY (FR). ROYERE, Christian [FR/FR]; 18, chemin des  
Montquartiers, F-92130 ISSY LES MOULINEAUX (FR).

(74) Mandataires : DOMENEGO, Bertrand etc.; CABINET  
LAVOIX, 2 Place d'Estienne d'Orves, F-75441 PARIS  
CEDEX 09 (FR).

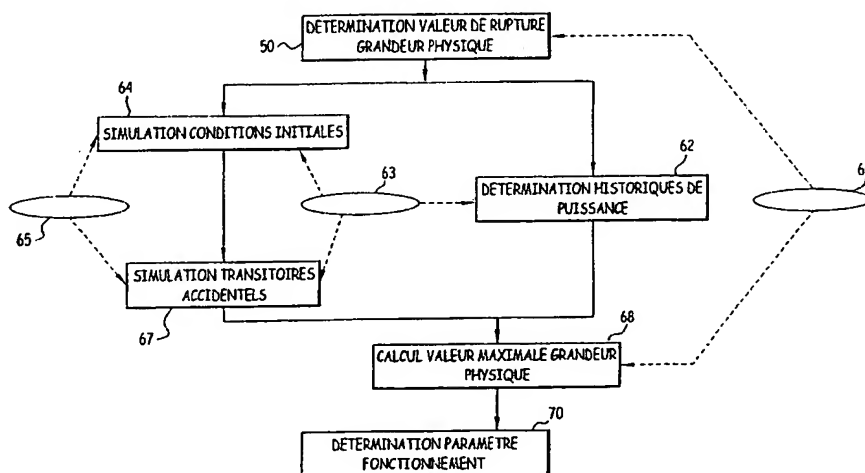
(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,  
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,  
DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,  
HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK,  
LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,  
MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD,  
SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,  
US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE,  
LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING A THRESHOLD VALUE OF A NUCLEAR REACTOR OPERATING PARAMETER, CORRESPONDING SYSTEM, COMPUTER PROGRAMME AND SUPPORT

(54) Titre : PROCÉDE DE DETERMINATION D'UNE VALEUR LIMITE D'UN PARAMETRE DE FONCTIONNEMENT D'UN REACTEUR NUCLEAIRE, SYSTEME, PROGRAMME D'ORDINATEUR ET SUPPORT CORRESPONDANTS



50...DETERMINING PHYSICAL QUANTITY FAILURE VALUE  
64...SIMULATING INITIAL CONDITIONS  
62...DETERMINING POWER HISTORY

67...SIMULATING ACCIDENTAL TRANSIENTS  
68...CALCULATING MAXIMUM PHYSICAL QUANTITY VALUE  
70...DETERMINING OPERATING PARAMETER

(57) Abstract: The invention concerns a method comprising the following steps: b) simulating at least a transient for operating the nuclear reactor, c) calculating the value reached by a physical quantity during the operating transient in at least one sheath (33) of a fuel pencil (24) of the reactor, and d) determining, as threshold value of an operating parameter of the reactor, the operating parameter value when the value calculated at step c) corresponds to a value of the physical quantity characterizing a failure of the fuel sheath (33).

[Suite sur la page suivante]

b) simuler au moins un transitoire de fonctionnement du réacteur nucléaire,

c) calculer la valeur atteinte par une grandeur physique au cours du transitoire de fonctionnement dans au moins une gaine d'un crayon combustible,

5 et

d) déterminer, en tant que valeur limite, la valeur du premier paramètre de fonctionnement lorsque la valeur calculée à l'étape c) correspond à une valeur de la grandeur physique caractérisant une rupture de la gaine.

Selon des modes particuliers de réalisation, le procédé peut  
10 comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :

- il comprend avant l'étape b) une étape de :

a) détermination d'une valeur de rupture de la grandeur physique caractérisant une rupture de la gaine,

15 - l'étape a) comprend les sous-étapes de :

a1) soumettre des crayons combustibles à des rampes de puissance nucléaire,

a2) calculer les valeurs atteintes par la grandeur physique dans au moins une gaine rompue lors d'une rampe de puissance,

20 a3) sélectionner la valeur minimale parmi les valeurs atteintes calculées à l'étape a2),

- la valeur de rupture utilisée à l'étape d) est égale à la valeur minimale sélectionnée à l'étape a3),

25 - la valeur de rupture utilisée à l'étape d) est égale à la valeur minimale sélectionnée à l'étape a3) et corrigée par un facteur représentatif d'un mode de fonctionnement du réacteur,

- le procédé comprend avant l'étape c) une étape de :

b') détermination d'au moins un crayon combustible dont la gaine est la plus sollicitée lors du transitoire simulé à l'étape b),

30 et l'étape c) est effectuée pour le ou chaque crayon déterminé à l'étape b'),

- l'étape b') comprend les sous-étapes de :

b'1) évaluation de la valeur atteinte par la grandeur physique dans les gaines de plusieurs crayons combustibles, et

b'2) sélection, en tant que crayon dont la gaine est la plus sollicitée, du crayon dont la valeur évaluée à l'étape b'1) est la plus élevée,

- le premier paramètre de fonctionnement est la puissance linéique fournie par un crayon combustible,

5       - le premier paramètre de fonctionnement est une durée de fonctionnement du réacteur à une puissance intermédiaire inférieure à sa puissance nominale,

- la valeur limite est une valeur limite de déclenchement d'un arrêt d'urgence du réacteur,

10       - le procédé comprend en outre au moins une étape de :

e) détermination d'une valeur limite de déclenchement d'une alarme à partir de la valeur limite d'arrêt d'urgence déterminée à l'étape d),

- l'étape b) est mise en œuvre pour au moins un mode de fonctionnement du réacteur choisi dans le groupe constitué par :

- 15       • un mode de fonctionnement à puissance globale du réacteur égale à sa puissance nominale,
- un mode de fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire où la puissance globale du réacteur est inférieure à sa puissance nominale sur une durée d'au
- 20       moins 8 h pour une plage de 24 h,
- un mode de fonctionnement en suivi de réseau où la puissance globale varie alternativement autour d'une puissance élevée et autour d'une puissance réduite,
- un mode de fonctionnement en réglage primaire où la
- 25       puissance globale du réacteur varie de 0 à 5% autour d'une valeur de référence comprise entre 95 et 100% de la puissance globale nominale du réacteur,

- pour au moins un mode de fonctionnement, on utilise les étapes b) à d) d'un autre mode de fonctionnement avec, comme valeur de rupture de la

30       grandeur physique, la valeur de rupture de cet autre mode de fonctionnement corrigé d'une valeur corrective,

- le transitoire simulé à l'étape b) est un transitoire choisi dans le groupe consistant en :

- une augmentation excessive de charge,
  - un retrait incontrôlé d'au moins un groupe de grappes de contrôle,
  - une chute de l'une des grappes de contrôle,
- 5           - la grandeur physique est une contrainte ou une fonction de contrainte(s) dans la gaine, et
- la grandeur physique est une densité d'énergie de déformation dans la gaine.

L'invention a en outre pour objet un système de détermination d'au moins  
10 un paramètre de fonctionnement d'un réacteur nucléaire, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de mise en œuvre des étapes d'un procédé tel que défini ci-dessus.

Selon une variante, le procédé comprend au moins un ordinateur et des moyens de stockage dans lesquels sont stockés au moins un programme pour  
15 l'exécution d'étapes du procédé de détermination mis en œuvre par le système.

L'invention a en outre pour objet un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé tel que défini ci-dessus.

L'invention a en outre pour objet un support utilisable dans un ordinateur et  
20 sur lequel est enregistré un programme tel que défini ci-dessus.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et faite en se référant aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique illustrant un réacteur nucléaire à  
25 eau pressurisée,
- la figure 2 est une vue schématique latérale d'un assemblage combustible du cœur du réacteur de la figure 1,
- la figure 3 est une vue schématique en coupe longitudinale d'un crayon combustible de l'assemblage de la figure 2,
- 30 - la figure 4 est un schéma bloc d'un système de détermination de valeurs limites de paramètres de fonctionnement du réacteur de la figure 1,
- la figure 5 est un organigramme illustrant des étapes successives du procédé mis en œuvre par le système de la figure 4,

- la figure 6 est une courbe illustrant des essais de rampe de puissance effectués sur des crayons combustibles,
- la figure 7 est un graphique illustrant les contraintes maximales atteintes dans les gaines de crayons combustibles lors d'essais de rampe de puissance,
- la figure 8 est un diagramme représentant des domaines de fonctionnement du réacteur de la figure 1,
- la figure 9 est une courbe illustrant la simulation d'un transitoire de puissance lorsque le réacteur de la figure 1 est en fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire,
- la figure 10 est une vue analogue à la figure 9, le transitoire étant simulé après un fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire puis retour à un fonctionnement à puissance nominale, et
- la figure 11 est une courbe illustrant le fonctionnement du réacteur en suivi de réseau.

La figure 1 illustre schématiquement un réacteur nucléaire 1 à eau pressurisée qui comprend classiquement :

- un cœur 2,
- un générateur de vapeur 3,
- une turbine 4 couplée à un générateur 5 d'énergie électrique, et
- un condenseur 6.

Le réacteur 1 comprend un circuit primaire 8 équipé d'une pompe 9 et dans lequel circule de l'eau sous pression, selon le trajet matérialisé par les flèches sur la figure 1. Cette eau remonte notamment au travers du cœur 2 pour y être réchauffée en assurant la réfrigération du cœur 2.

Le circuit primaire 8 comprend en outre un pressuriseur 10 permettant de mettre sous pression l'eau circulant dans le circuit primaire 8.

L'eau du circuit primaire 8 alimente également le générateur de vapeur 3 où elle est refroidie en assurant la vaporisation d'eau circulant dans un circuit secondaire 12.

La vapeur produite par le générateur 3 est canalisée par le circuit secondaire 12 vers la turbine 4 puis vers le condenseur 6 où cette vapeur est

condensée par échange de chaleur indirect avec de l'eau de refroidissement circulant dans le condenseur 6.

Le circuit secondaire 12 comprend en aval du condenseur 6 une pompe 13 et un réchauffeur 14.

5 De manière classique également, le cœur 2 comprend des assemblages combustibles 16 qui sont chargés dans une cuve 18. Un seul assemblage 16 est représenté sur la figure 1, mais le cœur 2 comprend par exemple 157 assemblages 16.

10 Le réacteur 2 comprend des grappes de contrôle 20 qui sont disposées dans la cuve 18 au-dessus de certains assemblages 16. Une seule grappe 20 est représentée sur la figure 1, mais le cœur 2 peut comprendre par exemple environ 60 grappes 20.

Les grappes 20 peuvent être déplacées par des mécanismes 22 pour venir s'insérer dans les assemblages combustibles 16 qu'elles surplombent.

15 Classiquement, chaque grappe de contrôle 20 comprend des crayons de contrôle en un matériau absorbant les neutrons.

Ainsi, le déplacement vertical de chaque grappe 20 permet de régler la réactivité du réacteur 1 et autorise des variations de la puissance globale P fournie par le cœur 2 depuis la puissance nulle jusqu'à la puissance nominale 20 PN, en fonction de l'enfoncement des grappes 20 dans les assemblages combustibles 16.

Certaines de ces grappes 20 sont destinées à assurer la régulation du fonctionnement du cœur 2, par exemple en puissance ou en température, et sont 25 dénommées grappes de réglage. D'autres sont destinées à l'arrêt du réacteur 1 et sont dénommées grappes d'arrêt.

Les grappes 20 sont réunies en groupes en fonction de leur nature et de leur destination. Par exemple pour les réacteurs de type 900 MWe CPY, ces groupes sont dénommés groupes G1, G2, N1, N2, R, SA, SB, SC, SD...

30 Comme illustré par la figure 2, chaque assemblage combustible 16 comprend de manière classique un réseau de crayons combustibles 24 et un squelette 26 de support des crayons 24.

Le squelette 26 comprenant classiquement un embout inférieur 28, un embout supérieur 30, des tubes guides reliant les deux embouts 26 et 28 et

destinés à recevoir des crayons de contrôle des grappes 20, et des grilles entretoises 32.

Comme illustré par la figure 3, chaque crayon combustible 24 comprend de manière classique, une gaine 33 sous forme d'un tube fermé à son extrémité inférieure par un bouchon inférieur 34 et à son extrémité supérieure par un bouchon supérieur 35. Le crayon 24 comprend une série de pastilles 36 empilées dans la gaine 33 et prenant appui contre le bouchon inférieur 34. Un ressort de maintien 40 est disposé dans le tronçon supérieur de la gaine 33 pour prendre appui sur le bouchon supérieur 35 et sur la pastille 36 supérieure.

Classiquement, les pastilles 36 sont en oxyde d'uranium et la gaine 33 en alliage de zirconium.

Sur la figure 3, qui correspond à un crayon combustible 24 issu de fabrication et avant d'irradiation, il existe un jeu radial J entre les pastilles 36 et la gaine 33. Cela est illustré plus particulièrement par la partie cerclée agrandie de la figure 3.

Lorsque le réacteur 1 va fonctionner, par exemple à sa puissance globale nominale PN, le combustible nucléaire des pastilles 36 va être, selon le terme employé dans la technique, conditionné.

Le conditionnement se caractérise essentiellement par la fermeture du jeu J entre les pastilles 36 et la gaine 33, due au fluage de la gaine 33 et au gonflement des pastilles 36.

Plus spécifiquement, on peut distinguer les étapes suivantes pour chaque pastille 36 :

1) Sous l'effet de la différence de pression entre l'extérieur (eau du circuit primaire 8) et l'intérieur du crayon 24, la gaine 33 se déforme progressivement par fluage radialement vers l'intérieur du crayon 24. Toutes choses égales par ailleurs, la vitesse de fluage de la gaine 33 est une caractéristique du matériau qui la constitue. Par ailleurs, les produits de fission, qui sont en majorité retenus dans la pastille 36, induisent un gonflement de la pastille 36. Durant cette phase, la sollicitation de la gaine 33 du point de vue des contraintes est uniquement le fait de la pression différentielle existant entre l'extérieur et l'intérieur du crayon 24. Les contraintes dans la gaine 33 sont des contraintes de compression (négatives par convention).

2) Le contact entre la pastille 36 et la gaine 33 s'amorce au bout d'un laps de temps qui dépend essentiellement des conditions locales d'irradiation (puissance, flux neutronique, température...) et du matériau de la gaine 33. En réalité, le contact s'établit de façon progressive sur une période qui débute par un  
5 contact mou suivi par l'établissement d'un contact fort. La pression de contact de l'oxyde de la pastille 36 sur la face interne de la gaine 33 conduit à une inversion des contraintes dans la gaine 33 qui deviennent positives et tendent à solliciter la gaine en traction.

3) Le gonflement de la pastille 36 se poursuit et impose alors sa  
10 déformation à la gaine 33 vers l'extérieur. En régime permanent établi, cette expansion est suffisamment lente pour que la relaxation du matériau de la gaine 33 permette un équilibre des efforts dans la gaine 33. Une analyse montre que dans ces conditions le niveau des contraintes en traction est modéré (quelques dizaines de MPa) et ne présente pas de risque vis-à-vis de l'intégrité de la gaine  
15 33.

S'il n'y a pas de risque de rupture de la gaine 33 en régime permanent du fait de l'équilibre thermomécanique dans la gaine 33 à des niveaux de contraintes assez faibles, un risque apparaît par contre dès que la puissance fournie par le crayon 24 varie fortement.

20 En effet, une augmentation de puissance engendre une augmentation de la température dans le crayon 24. Etant donnée la différence des caractéristiques mécaniques (coefficient de dilatation thermique, module d'Young) et la différence de température entre la pastille 36 en oxyde d'uranium et la gaine 33 en alliage de zirconium, la pastille 36 va se dilater davantage que  
25 la gaine 33 et imposer sa déformation à cette dernière.

Par ailleurs, la présence dans l'espace entre la gaine 33 et la pastille 36 de produits de fission corrosifs, tels que l'iode, crée les conditions de la corrosion sous contrainte. Ainsi, la déformation imposée par la pastille 36 à la gaine 33 lors d'un transitoire, ou variation, de puissance peut provoquer une  
30 rupture de la gaine 33.

Or, une telle rupture de la gaine 33 n'est pas admissible pour des raisons de sûreté puisqu'elle pourrait résulter en la libération de produits de fission dans le circuit primaire 8.



Des transitoires de puissance peuvent se produire lors d'un fonctionnement normal du réacteur 1, c'est-à-dire dans les situations dites de catégorie 1. En effet, des variations de puissance peuvent être nécessaires notamment pour s'adapter aux besoins en énergie électrique du réseau que le générateur 5 alimente. Des transitoires de puissance peuvent également se produire dans les situations accidentelles dites de catégorie 2, comme l'augmentation excessive de charge, le retrait incontrôlé de groupe(s) de grappes 20 en puissance, la dilution d'acide borique ou encore la chute de grappes 20 non détectée.

10 Pour garantir l'intégrité des crayons 24 vis-à-vis de l'interaction pastilles 36 - gaines 33, l'invention propose de déterminer des valeurs limites de paramètres de fonctionnement du réacteur 1 en prenant en compte cette interaction pastille - gaine.

Pour cela, on peut utiliser, par exemple, un système informatique 40  
15 telle que celui de la figure 4. Ce système 40 comprend par exemple une unité de traitement d'informations 42 comprenant un ou plusieurs processeur(s), des moyens 44 de stockage des données, des moyens 46 d'entrée/sortie et éventuellement des moyens 48 d'affichage.

Le procédé de détermination des valeurs limites des paramètres de  
20 fonctionnement est illustré par l'organigramme de la figure 5.

Une première étape illustrée par le bloc 50 consiste à déterminer une valeur d'une grandeur physique pour laquelle une rupture d'une gaine 33 d'un crayon 24 intervient lors d'une augmentation de la puissance nucléaire fournie par le crayon 24.

25 La grandeur physique est par exemple la contrainte circonférentielle et normale  $\sigma_\theta$  dans la gaine 33. Dans d'autres variantes, il peut s'agir d'une fonction de contrainte(s), par exemple de la différence entre  $\sigma_\theta$  et la contrainte radiale et normale  $\sigma_r$  ou de la densité d'énergie de déformation dans la gaine 33.

Pour déterminer la valeur de rupture, on peut soumettre un certain  
30 nombre de tronçons de crayons 24, par exemple pré-irradiés dans des réacteurs de puissance et correspondant donc à des niveaux d'épuisement différents, à des rampes ou augmentation brutale de puissance dans des réacteurs d'essais.

De telles rampes sont schématisées sur la figure 6 où la puissance linéique PLIN fournie par un tronçon de crayon 24 est portée en ordonnée et le temps est porté en abscisse.

La courbe 52 en trait mixte sur la figure 6 illustre une rampe de puissance subie par un tronçon de crayon 24 au cours de laquelle aucune rupture de la gaine 33 n'intervient.

La forte puissance fournie par le tronçon de crayon 24 à l'issue de la rampe est représentée par la partie 54 de la courbe 52. Cette forte puissance est maintenue pendant plusieurs heures.

La courbe 56 en trait plein illustre le cas d'un tronçon de crayon 24 pour lequel une rupture de la gaine 33 intervient. Dans ce cas, la rampe qui est schématisée par la partie 58 de la courbe 56, est interrompue immédiatement et la puissance PLIN ramenée rapidement à 0.

On calcule, pour chaque tronçon de crayon 24, la valeur maximale  $\sigma_{\theta\text{MAX}}$  atteinte par la grandeur physique  $\sigma_{\theta}$  grâce à un logiciel qui est repéré par la référence 60 sur la figure 5 et qui est par exemple stocké dans les moyens 44 de stockage du système 40. Un tel logiciel 60 peut être un logiciel classique faisant intervenir les éléments finis pour modéliser le comportement thermomécanique du tronçon de crayon 24.

La figure 7 fait apparaître les valeurs  $\sigma_{\theta\text{MAX}}$  ainsi calculées pour l'ensemble des tronçons de crayons 24 qui correspondent chacun à un épuisement différent.

Sur la figure 7, la contrainte est portée en ordonnée et l'épuisement en abscisse.

La valeur de rupture retenue sera inférieure ou égale au minimum parmi les valeurs  $\sigma_{\theta\text{MAX}}$  pour lesquelles une rupture de gaine 33 est effectivement intervenue.

Dans l'exemple de la figure 7, une seule rupture est intervenue sur un crayon 24 qui est repéré par le carré plein 61.

Ainsi, la valeur de rupture  $\sigma_{\theta\text{RUP}}$  retenue pour la suite du procédé est d'environ 535 MPa.

Ensuite, et comme schématisé par le bloc 62 sur la figure 5, on engendre les historiques de puissance pour chaque crayon 24 présent dans le cœur 2.

En effet, l'état thermomécanique local d'un crayon 24 dépend de cet historique. Il peut donc être utile de connaître l'historique de la puissance fournie par chaque crayon 24 depuis son introduction dans le cœur 2 jusqu'au moment d'un accident que l'on va simuler.

Ces historiques peuvent être établis avec un logiciel de modélisation du comportement neutronique des crayons 24, désigné par la référence numérique 63 sur la figure 5 et stocké dans les moyens 44. Un tel logiciel peut être un logiciel classique fondé sur les éléments finis.

Les historiques de fonctionnement relatifs à chaque crayon 24 sont générés pour différents modes de fonctionnement du cœur 2, à savoir :

- le fonctionnement en base où la puissance globale  $P$  du cœur 2 est égale à sa puissance nominale  $PN$ ,
- le fonctionnement à puissance réduite avec les grappes de contrôle 20 insérées dans les assemblages combustibles 16,
- le fonctionnement à puissance réduite avec les grappes de contrôle 20 extraites des assemblages combustibles 16.

Les historiques peuvent être générés en prenant en compte différents niveaux de puissance réduite, par exemple 10%  $PN$ , 30%  $PN$ , 50%  $PN$ ...

La simulation des conditions initiales d'un accident de catégorie 2, illustrée par le bloc 64 sur la figure 5, est effectuée grâce au logiciel 63 et par exemple à l'aide d'un autre logiciel 65 de simulation du comportement de l'ensemble du réacteur 1. Il peut s'agir d'un logiciel classique incluant notamment une prise en compte des régulations d'un système de protection du réacteur 1.

Les conditions simulées lors de l'étape 64 correspondent à une situation dite de catégorie 1.

Une telle situation est située dans le domaine 66 du diagramme de la figure 8 où le pourcentage de la puissance globale  $P$  du réacteur 1 par rapport à sa puissance nominale  $PN$  est portée en ordonnée et l'écart de puissance  $\Delta I$  entre la partie haute et la partie basse du cœur 2 est portée en abscisse.

Les conditions initiales dans le plan  $P/\Delta I$  sont choisies de manière à maximiser l'accroissement de la puissance locale en cas de transitoire de puissance dans le cœur 2.

Ces conditions initiales sont obtenues par des oscillations xénon, générées par des variations instantanées de puissance globale  $P$  du réacteur 2 combinée à des mouvements de grappes de contrôle 20, conduisant à des distributions de puissance pénalisantes dans le cœur 2.

Ainsi, les conditions initiales peuvent être caractérisées par :

- le taux d'épuisement dans les crayons 24;
- la puissance globale  $P$  fournie par le cœur 2,
- la distribution axiale de puissance dans le cœur 2,
- la distribution axiale de xénon,
- la position des grappes de contrôle 20, et
- la concentration en bore dans l'eau du circuit primaire 8.

Après l'étape schématisée par le bloc 64, on simule, comme schématisé par le bloc 67, des transitoires accidentels de fonctionnement du réacteur 1 qui induisent des variations brusques de puissance. Ces transitoires sont simulés par exemple grâce aux logiciels 63 et 65. Les transitoires accidentels sont simulés à partir des conditions initiales déterminées à l'étape 64, à plusieurs instants dans chaque cycle.

Les transitoires simulés sont les transitoires accidentels dits de catégorie 2 induisant les variations de puissance les plus fortes et les plus rapides dans le cœur 2.

Ces transitoires sont les suivants :

- l'augmentation excessive de charge,
- le retrait incontrôlé de groupes de grappes de contrôle 20, alors que le réacteur 1 est en puissance,
- la chute de grappe(s) 20.

L'augmentation excessive de charge correspond à une augmentation rapide du débit de vapeur dans le générateur de vapeur 3. Une telle augmentation entraîne un déséquilibre entre la puissance thermique du cœur 2 et la charge du générateur de vapeur 3. Ce déséquilibre conduit à un refroidissement du circuit primaire 8. Du fait de l'effet modérateur et/ou de la

régulation de la température moyenne dans le cœur 2 par les grappes de contrôle 20, la réactivité, et donc le flux nucléaire, augmentent dans le cœur 2. Ainsi, la puissance globale P fournie par le cœur 2 augmente rapidement.

Pour simuler ce transitoire, on considère que le débit de vapeur dans le générateur 3 augmente de sa valeur initiale jusqu'à la valeur maximale autorisée par les caractéristiques du circuit secondaire 12. Cette augmentation est par ailleurs suffisamment lente pour les niveaux de puissance étudiés afin d'éviter l'arrêt automatique du réacteur par basse pression du pressuriseur 10.

Le retrait incontrôlé de groupes de grappes de contrôle 20 alors que le réacteur fonctionne provoque une augmentation incontrôlée de la réactivité. Il en résulte une augmentation rapide de la puissance nucléaire globale P et du flux de chaleur dans le cœur 2. Jusqu'à l'ouverture d'une vanne de décharge ou d'une soupape de sûreté du circuit secondaire 12, l'extraction de chaleur dans le générateur de vapeur 3 augmente moins vite que la puissance dégagée dans le circuit primaire 8. Il en résulte un accroissement de la température et de la pression de l'eau du circuit primaire 8. Pour simuler ce transitoire, on suppose un retrait des groupes de puissance à la vitesse maximale de 72 pas/mn jusqu'à l'extraction totale.

Si une ou plusieurs des grappes de contrôle 20 chute dans le cœur, il en résulte une réduction immédiate de la réactivité et de la puissance globale P dans le cœur 2. En l'absence d'action protectrice, le déséquilibre ainsi induit entre le circuit primaire 8 et le circuit secondaire 12 entraîne une diminution de la température d'entrée de l'eau dans le cœur 2, ainsi qu'une augmentation de la puissance neutronique par les contre-réactions et la régulation de température, jusqu'à l'atteinte d'un nouvel équilibre entre le circuit primaire 8 et le circuit secondaire 12. La présence de la ou des grappes de contrôle 20 ayant chutée provoque une déformation de la distribution radiale de puissance, tandis que le retrait du groupe de régulation conduit à une modification axiale de la puissance.

On a constaté que d'autres transitoires accidentels de puissance n'avaient pas besoin d'être simulés puisqu'ils s'avéraient moins pénalisants que ceux cités précédemment. C'est notamment le cas de l'accident de dilution.

Après détermination des historiques de puissance et simulation des transitoires accidentels, on va calculer à l'étape 68, la valeur de la grandeur

physique  $\sigma_0$  atteinte dans les crayons 24 au cours des transitoires simulés à l'étape 67. Cette étape 68 utilise les résultats des étapes 62 et 67. En fait, cette étape 68 va comprendre, pour chaque transitoire, une première sous-étape où ce calcul va être effectué grossièrement pour chacun des crayons 24. Ce calcul  
5 grossier peut être effectué grâce au logiciel 60. En variante, ce calcul peut n'être effectué que pour  $1/8^{\text{ème}}$  des crayons 24 pour des raisons de symétrie du cœur 2.

On va alors déterminer dans quel crayon 24 la valeur la plus élevée de la grandeur physique  $\sigma_0$  sera atteinte. Il s'agira donc du crayon 24 dont la gaine 33 est la plus sollicitée, ou crayon limitant. En variante, on peut sélectionner  
10 plusieurs crayons limitants.

Une fois le crayon 24 limitant ainsi déterminé, on va calculer de manière précise dans une deuxième sous-étape, pour ce seul crayon 24, la valeur maximale de la grandeur physique  $\sigma_0$  atteinte dans sa gaine 33. Ce calcul précis peut être effectué par le logiciel 60.

15 Ensuite, et comme schématisé par le bloc 70, on va pouvoir déterminer par comparaison de la valeur maximale calculée à l'étape 68 avec la valeur de rupture  $\sigma_{0RUP}$  déterminée à l'étape 50 si un risque de rupture de gaine 33 est encouru lors d'un transitoire accidentel.

Ainsi, on va pouvoir déterminer au cours de l'étape 70 quelles sont les  
20 valeurs de paramètres de fonctionnement du cœur 2 au moment d'une rupture de gaine 33 lors des transitoires accidentels simulés. Ces valeurs déterminées seront alors les valeurs limites des paramètres de fonctionnement qu'un exploitant du réacteur 1 devra respecter.

Un tel paramètre de fonctionnement peut être par exemple la  
25 puissance linéique PLIN dans les crayons 24. La valeur limite du paramètre ainsi déterminée peut être utilisée pour piloter le réacteur 1 et notamment pour établir des seuils d'arrêt d'urgence ou d'alarme.

En effet, le seuil d'arrêt d'urgence peut être par exemple égal à la valeur de PLIN déterminée lors de l'étape 70 et les seuils d'alarme correspondent  
30 à cette valeur limite minorée par exemple d'un certain pourcentage.

Dans des modes particuliers de mise en œuvre du procédé, on prend en compte lors des étapes 64 et 67, les modes de fonctionnement suivants du réacteur 1 :

- fonctionnement de base, le réacteur 1 fonctionnant à sa puissance globale nominale PN,
  - fonctionnement prolongé à puissance globale intermédiaire PI,
  - le retour au fonctionnement de base après fonctionnement prolongé
- 5 à puissance globale intermédiaire PI,
- le fonctionnement en suivi de réseau,
  - le fonctionnement en réglage primaire,
  - le fonctionnement en télé réglage.

La simulation d'un transitoire accidentel lors du fonctionnement de

10 base correspond, pour chaque crayon 24, à la simulation d'une rampe de puissance telle que celle représentée sur la figure 6.

Le fonctionnement prolongé, à puissance intermédiaire est défini comme étant le fonctionnement du réacteur 1 en régime permanent, à une puissance globale PI inférieure ou égale à environ 92% de sa puissance

15 nominale PN sur une durée de plus de 8 h par plage de 24 h.

Un tel fonctionnement a pour effet de déconditionner les pastilles 36 dans les crayons 24.

En effet, si localement la puissance diminue, il en résulte une diminution de température dans les pastilles 36 et dans la gaine 33, qui entraîne

20 une diminution des dilatations thermiques de ces éléments. Chaque pastille 36 possède un coefficient de dilatation thermique plus important que celui de la gaine 33 et rétrocede donc une dilatation absolue plus importante.

Ce phénomène est en outre accentué par le fait que pour une baisse de puissance locale donnée, la variation de température dans chaque pastille 36

25 est plus importante que celle dans la gaine 33.

Pour les crayons 24 où le contact entre la gaine 33 et les pastilles 36 n'est pas établi, le jeu radial J s'agrandit. En ce qui concerne les crayons 24 où le jeu J était fermé, le jeu J se réouvre.

En cas de réouverture du jeu J, il y a fluage en compression de la

30 gaine 33 par effet de pression. Il en résulte une augmentation de la contrainte  $\sigma_0$  dans la gaine 33 quand survient le transitoire accidentel.

La figure 9 illustre, pour un crayon 24, la simulation d'un transitoire accidentel lors d'un tel fonctionnement. La puissance linéique PLIN dans le crayon 24 y est portée en ordonnée et le temps  $t$  en abscisse.

Le tronçon 72 de la courbe correspond au fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire. La puissance linéique PILIN dans le crayon 24 est alors inférieure à la puissance linéique nominale PNLIN correspondant à la puissance globale nominale PN. Le transitoire, qui correspond à une rampe de puissance, est schématisé par le tronçon 74 de cette même courbe. Ce transitoire se termine par une rupture de la gaine 33 au point 76.

La simulation du fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire peut être effectuée pour plusieurs valeurs de puissance intermédiaire PILIN afin de couvrir diverses situations susceptibles d'être rencontrées lors de l'exploitation du réacteur 1.

En outre, cette simulation peut être effectuée pour déterminer la durée maximale autorisée  $t_{max}$  de ce mode de fonctionnement pour que le transitoire 74 suivant le palier 72 n'induisse pas de rupture de gaine 33.

Pour cela, on simule des paliers 72 de durée croissante jusqu'à atteindre la valeur de rupture de la grandeur physique sélectionnée. La durée  $t_{max}$  est la durée du palier 72 pour lequel la valeur de rupture est atteinte.

Le retour au fonctionnement de base après fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire mérite d'être étudié vis-à-vis des interactions pastilles/gaines pour la raison suivante.

Si la puissance locale augmente, il en résulte une augmentation des températures dans les pastilles 36 et dans la gaine 33 d'un crayon 24. Le coefficient de dilatation thermique de chaque pastille 36 étant plus important que celui de la gaine 33, la pastille 36 impose sa déformation à la gaine 33 en y engendrant des contraintes relativement élevées. Il se produit donc un reconditionnement du combustible.

Un tel fonctionnement est illustré par la courbe de la figure 10 où le palier 72 à la puissance linéique PILIN est suivi d'un palier 78 à la valeur nominale PNLIN.

Pour la simulation du retour au fonctionnement de base, le palier 72 de la figure 10 dure de préférence la durée  $t_{max}$ .



Le fonctionnement en suivi de réseau est un fonctionnement dans lequel le réacteur 1 fonctionne alternativement autour d'une puissance globale réduite PR et au voisinage de sa puissance nominale globale PN. La puissance réduite peut être par exemple d'environ 30 ou 50% de PN. Par exemple, la durée de fonctionnement autour de la puissance réduite peut être de 8 h et celle au voisinage de la puissance maximale PN de 16 h pour une période de 24 h. La puissance globale P peut varier dans chaque phase autour de la valeur de référence correspondante PR ou PN pour s'adapter aux besoins en énergie électrique du réseau alimenté par le générateur 5. Lorsque la valeur de référence est PN, les variations de puissance ne sont que négatives.

La simulation du fonctionnement dans ce mode peut être effectuée à partir du fonctionnement de base.

Dans ce cas, on utilise comme valeur de rupture la valeur calculée précédemment diminuée d'une valeur corrective. Cette valeur corrective peut être typiquement de l'ordre de 20 MPa lorsque la grandeur physique considérée  $\sigma_0$  est une contrainte ou une différence de contraintes.

Pour déterminer la valeur corrective on peut utiliser le logiciel 60. On simule alors grossièrement des transitoires en fonctionnement de base et des transitoires en fonctionnement en suivi de réseau.

Pour simplifier les calculs, on peut modéliser le fonctionnement en suivi de réseau selon la courbe de la figure 11 où la puissance linéique PLIN est portée en ordonnée et le temps t est porté en abscisse. Les oscillations autour des valeurs haute et basse ne sont pas représentées. Pour les prendre en compte on effectue plusieurs simulations avec des puissances réduites PRLIN et des puissances élevées PELIN dans les plages de variation. La différence entre les valeurs maximales de  $\sigma_0$  calculées par le logiciel 60 pour les deux modes de fonctionnement constitue alors la valeur corrective.

Dans le mode de fonctionnement en réglage primaire, la puissance globale P oscille autour d'une valeur de référence de l'ordre de 98% de PN. Les variations autour de cette valeur de référence peuvent être de plus 2% et de moins 3% de PN.

Dans le mode de fonctionnement en téléajustage, la puissance globale P oscille autour d'une valeur de référence de l'ordre de 92% de PN. Les

variations autour de cette valeur de référence peuvent être de plus 8% et de moins 7% de PN.

De même que pour le fonctionnement en suivi de réseau, le fonctionnement en réglage primaire et le fonctionnement en télé réglage peuvent être simulés à partir du fonctionnement de base, la valeur de la grandeur physique caractérisant la rupture étant à nouveau affectée d'un biais.

Ainsi, on n'effectue qu'un seul calcul en fonctionnement de base et l'on utilise une valeur de rupture corrigée pour prendre en compte le fonctionnement de base, le fonctionnement en suivi de réseau, le fonctionnement en réglage primaire et le fonctionnement en télé réglage.

Dans un mode de réalisation plus simple, on peut ne tenir compte que du fonctionnement de base.

La simulation du mode de fonctionnement de base, ou les différentes simulations des modes de fonctionnement, peuvent être effectuées pour chaque configuration respective des groupes de grappes de contrôle 20, à différents taux d'épuisement des crayons 24.

On dispose ainsi par exemple d'une valeur limite de puissance linéique PLIN pour chaque configuration de grappes de contrôle 20 et par taux d'épuisement.

Outre ces valeurs limites que l'on va utiliser comme seuils d'arrêt automatique du réacteur 2, l'étape 70 de la figure 5 permet également d'établir des seuils à partir desquels d'autres actions que l'arrêt du réacteur 2 vont être automatiquement déclenchées. Il s'agit par exemple d'un seuil dit C4, qui correspond aux valeurs du seuil d'arrêt d'urgence minorées de 3%, et à partir desquelles la charge de la turbine 4 sera automatiquement limitée.

Il peut également s'agir d'un seuil d'alarme qui peut être réglé aux valeurs du seuil C4 minorées de 3%.

Le procédé ainsi mis en œuvre peut conduire à une limitation des domaines d'exploitation représentés sur la figure 8.

Sur cette figure, la référence numérique 90 désigne le domaine correspondant aux situations de fonctionnement de catégorie 2. Ce domaine est situé autour du domaine 66. Les références numériques 92 désignent des

frontières (en pointillés) de ce domaine telles qu'elles étaient établies avant l'utilisation du procédé selon l'invention.

La mise en œuvre du procédé de l'invention conduit à redéfinir certaines de ces frontières 92. Les nouvelles frontières 94 sont représentées en trait plein sur la figure 8. Comme on peut le constater, le domaine 90 redéfini à partir du procédé de l'invention est donc plus étroit. Les frontières 94, qui correspondent aux seuils d'arrêt d'urgence, sont donc plus pénalisantes que celles utilisées jusqu'à présent. Le fonctionnement du réacteur 1 utilisant les paramètres limites obtenus grâce au procédé est donc plus sûr.

On notera que chaque tronçon de droite des frontières 94 correspond à des couples de valeurs limites de  $P$  et de  $\Delta I$ .

La durée  $t_{max}$  déterminée constitue également une valeur limite d'un paramètre de fonctionnement déterminée grâce au procédé. Cette valeur permet à un exploitant d'augmenter la durée de fonctionnement à puissance réduite et donc d'exploiter au mieux les capacités du réacteur 2 en réduisant les risques d'endommagement des crayons 24.

Ainsi, le procédé décrit permet de vérifier les valeurs limites de paramètres de fonctionnement et les procédures de sûreté, de modifier les valeurs limites de paramètres de fonctionnement du réacteur 1 si nécessaire et de convertir d'anciennes limites trop étroites en marge d'exploitation. Ainsi, il est possible d'assurer un fonctionnement sûr de ce dernier tout en exploitant mieux ses capacités.

De manière générale, l'étape 50 pourra être mise en œuvre séparément du reste du procédé de détermination de valeurs limites de paramètres du fonctionnement du réacteur 2.

De manière générale également, les différentes étapes de ce procédé peuvent être mises en œuvre par un seul et même logiciel mémorisé dans les moyens 44.

Les principes ci-dessus peuvent s'appliquer à d'autres types de réacteur que les réacteurs à eau pressurisée, par exemple aux réacteurs à eau bouillante.

REVENDICATIONS

1. Procédé de détermination d'au moins une valeur limite ( $t_{max}$ ) d'au moins un premier paramètre ( $t$ ,  $PLIN$ ,  $P$ ,  $\Delta I$ ) de fonctionnement d'un réacteur nucléaire (1) comprenant un cœur (2) dans lequel des assemblages combustibles (16) sont chargés, les assemblages combustibles (16) comprenant des crayons combustibles (24) comportant chacun des pastilles (36) de combustible nucléaire et une gaine (33) entourant les pastilles (36), caractérisé en ce qu'il comprend les étapes de :
- b) simuler au moins un transitoire de fonctionnement du réacteur nucléaire (2),
- c) calculer la valeur atteinte par une grandeur physique ( $\sigma_\theta$ ) au cours du transitoire de fonctionnement dans au moins une gaine (33) d'un crayon combustible (24), et
- d) déterminer, en tant que valeur limite, la valeur du premier paramètre de fonctionnement lorsque la valeur calculée à l'étape c) correspond à une valeur ( $\sigma_{\theta RUP}$ ) de la grandeur physique caractérisant une rupture de la gaine (33).
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend avant l'étape b) une étape de :
- a) détermination d'une valeur de rupture ( $\sigma_{\theta RUP}$ ) de la grandeur physique caractérisant une rupture de la gaine (33).
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que l'étape a) comprend les sous-étapes de :
- a1) soumettre des crayons combustibles (24) à des rampes de puissance nucléaire,
- a2) calculer les valeurs atteintes ( $\sigma_{\theta MAX}$ ) par la grandeur physique ( $\sigma_\theta$ ) dans au moins une gaine (33) rompue lors d'une rampe de puissance,
- a3) sélectionner la valeur minimale parmi les valeurs atteintes calculées à l'étape a2).
4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la valeur de rupture utilisée à l'étape d) est égale à la valeur minimale sélectionnée à l'étape a3).
5. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la valeur de rupture utilisée à l'étape d) est égale à la valeur minimale sélectionnée à l'étape

21.

a3) et corrigée par un facteur représentatif d'un mode de fonctionnement du réacteur.

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend avant l'étape c) une étape de :

5        b') détermination d'au moins un crayon combustible (24) dont la gaine (33) est la plus sollicitée lors du transitoire simulé à l'étape b),

et en ce que l'étape c) est effectuée pour le ou chaque crayon (24) déterminé à l'étape b').

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que l'étape b')  
10 comprend les sous-étapes de :

b'1) évaluation de la valeur atteinte par la grandeur physique ( $\sigma_\theta$ ) dans les gaines (33) de plusieurs crayons combustibles (24), et

b'2) sélection, en tant que crayon dont la gaine (33) est la plus sollicitée, du crayon (24) dont la valeur évaluée à l'étape b'1) est la plus élevée.

15        8. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le premier paramètre de fonctionnement est la puissance linéique (PLIN) fournie par un crayon combustible (24).

9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le premier paramètre de fonctionnement est une durée (t) de fonctionnement du  
20 réacteur (1) à une puissance intermédiaire inférieure à sa puissance nominale (PN).

10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la valeur limite est une valeur limite de déclenchement d'un arrêt d'urgence du réacteur (1).

25        11. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il comprend en outre au moins une étape de :

e) détermination d'une valeur limite de déclenchement d'une alarme à partir de la valeur limite d'arrêt d'urgence déterminée à l'étape d).

12. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce  
30 que l'étape b) est mise en œuvre pour au moins un mode de fonctionnement du réacteur (1) choisi dans le groupe constitué par :

- un mode de fonctionnement à puissance globale du réacteur (1) égale à sa puissance nominale,

- un mode de fonctionnement prolongé à puissance intermédiaire où la puissance globale du réacteur (1) est inférieure à sa puissance nominale sur une durée d'au moins 8 h pour une plage de 24 h,

- un mode de fonctionnement en suivi de réseau où la puissance globale  
5 varie alternativement autour d'une puissance élevée (PN ; PE) et autour d'une puissance réduite (PR),

- un mode de fonctionnement en réglage primaire où la puissance globale du réacteur (1) varie de 0 à 5% autour d'une valeur de référence comprise entre 95 et 100% de la puissance globale nominale du réacteur (2).

10 13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce que, pour au moins un mode de fonctionnement, on utilise les étapes b) à d) d'un autre mode de fonctionnement avec, comme valeur de rupture de la grandeur physique, la valeur de rupture de cet autre mode de fonctionnement corrigé d'une valeur corrective.

15 14. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le transitoire simulé à l'étape b) est un transitoire choisi dans le groupe consistant en :

- une augmentation excessive de charge,
- un retrait incontrôlé d'au moins un groupe de grappes de contrôle (20),
- 20 - une chute de l'une des grappes de contrôle (20).

15. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la grandeur physique est une contrainte ou une fonction de contrainte(s) dans la gaine (33).

25 16. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la grandeur physique est une densité d'énergie de déformation dans la gaine (33).

30 17. Système (40) de détermination d'au moins une valeur limite d'un paramètre de fonctionnement d'un réacteur nucléaire (2), caractérisé en ce qu'il comprend des moyens (42, 44, 46, 48) de mise en œuvre des étapes d'un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes.

18. Système selon la revendication 17, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un ordinateur (42) et des moyens (44) de stockage dans lesquels sont

stockés au moins un programme pour l'exécution d'étapes du procédé de détermination mis en œuvre par le système.

19. Programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 16.

5 20. Support utilisable dans un ordinateur et sur lequel est enregistré un programme selon la revendication 19.

1/11

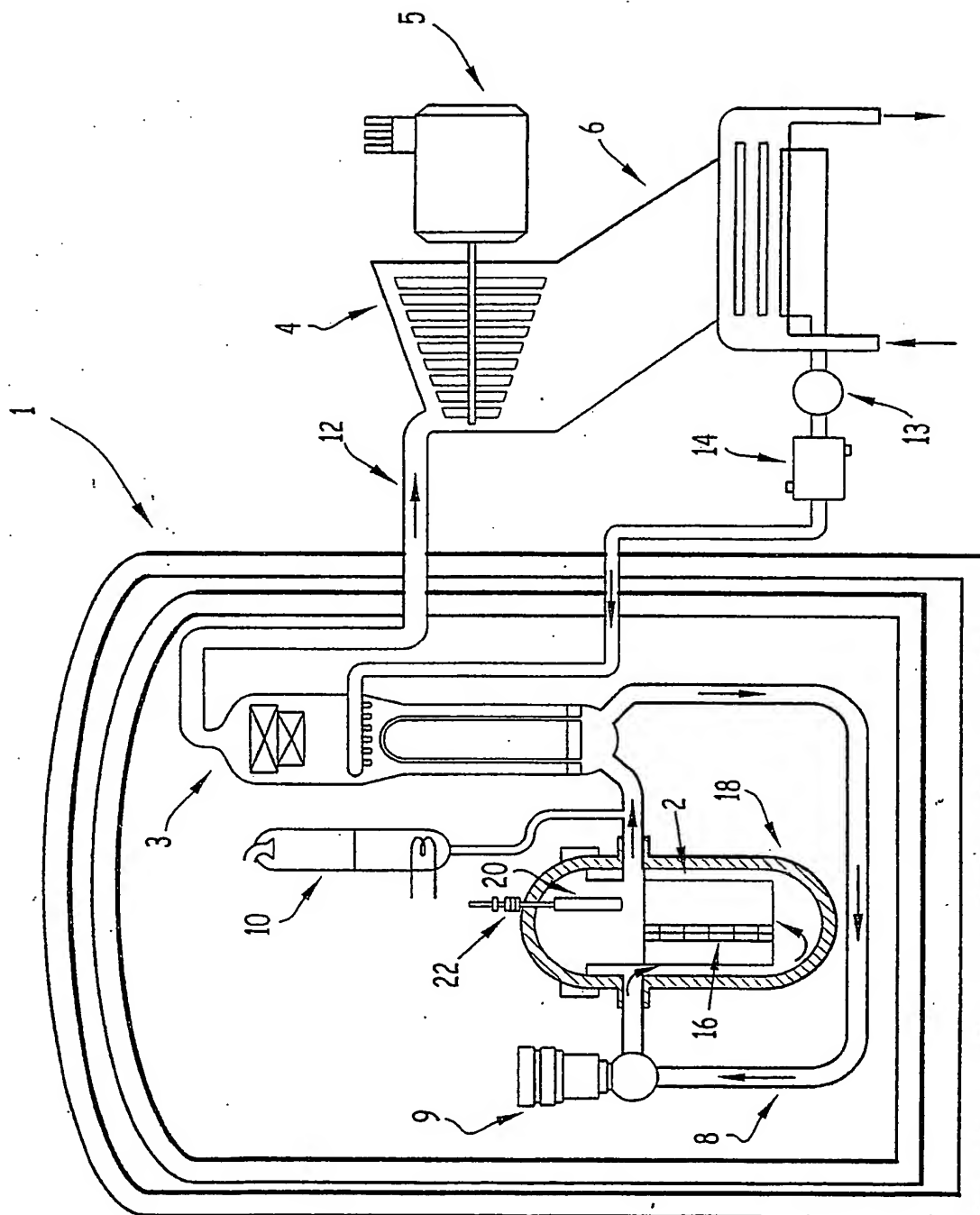
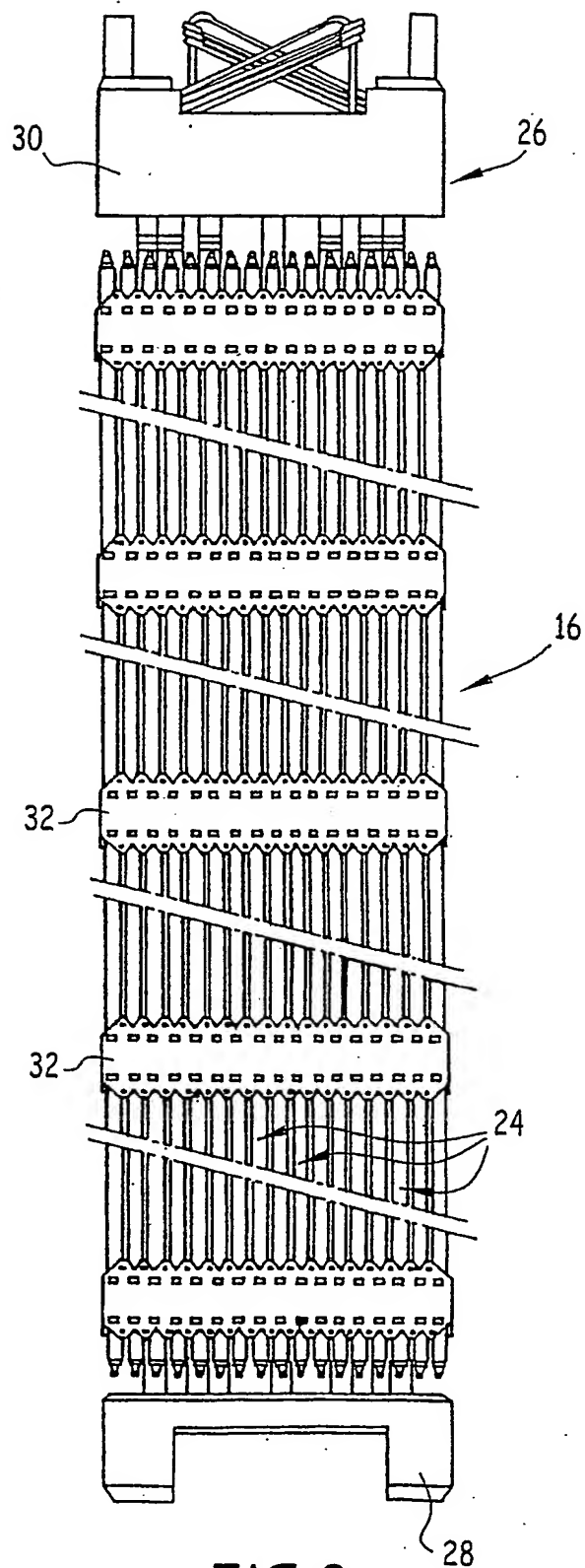


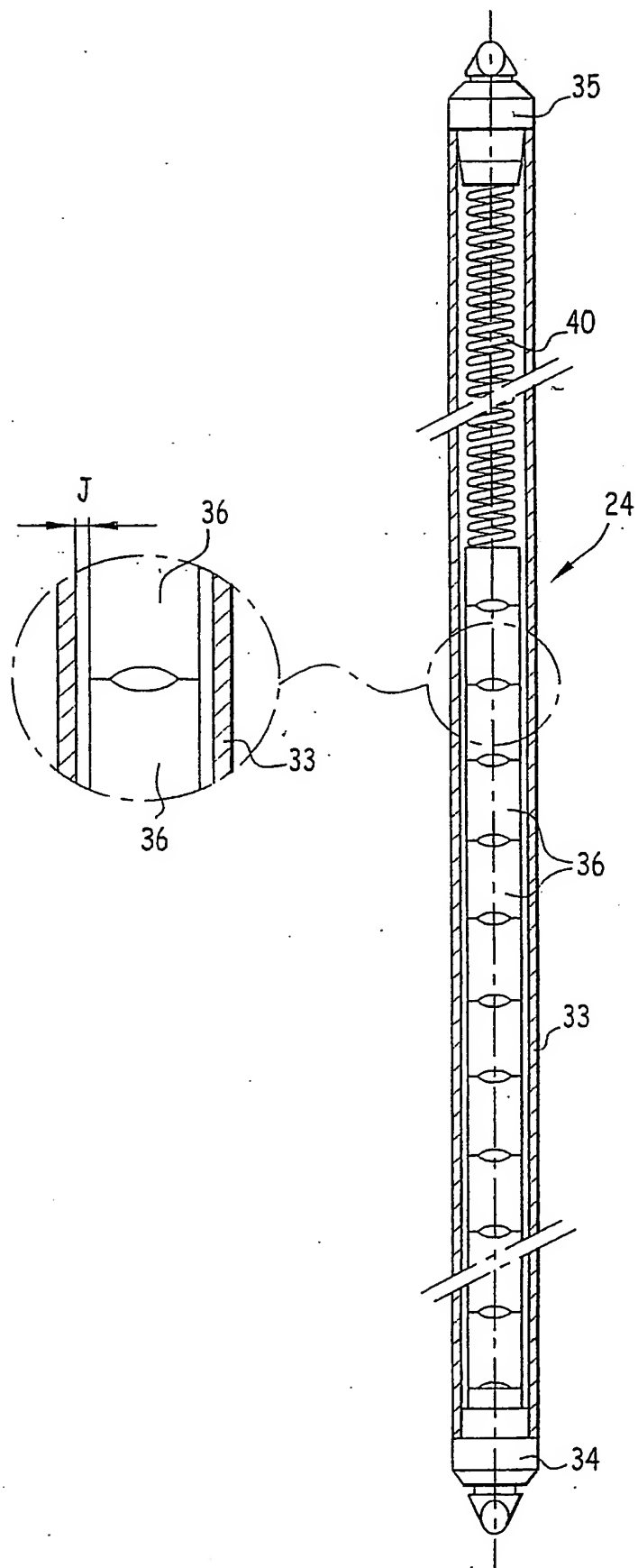
FIG. 1



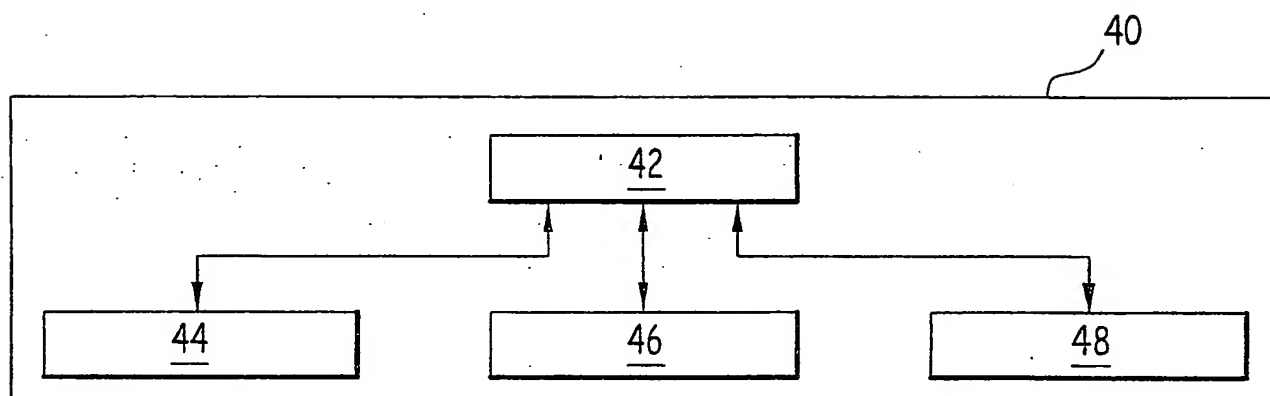
2/11

FIG. 2

3/11

FIG.3

4/11

FIG. 4

5/11

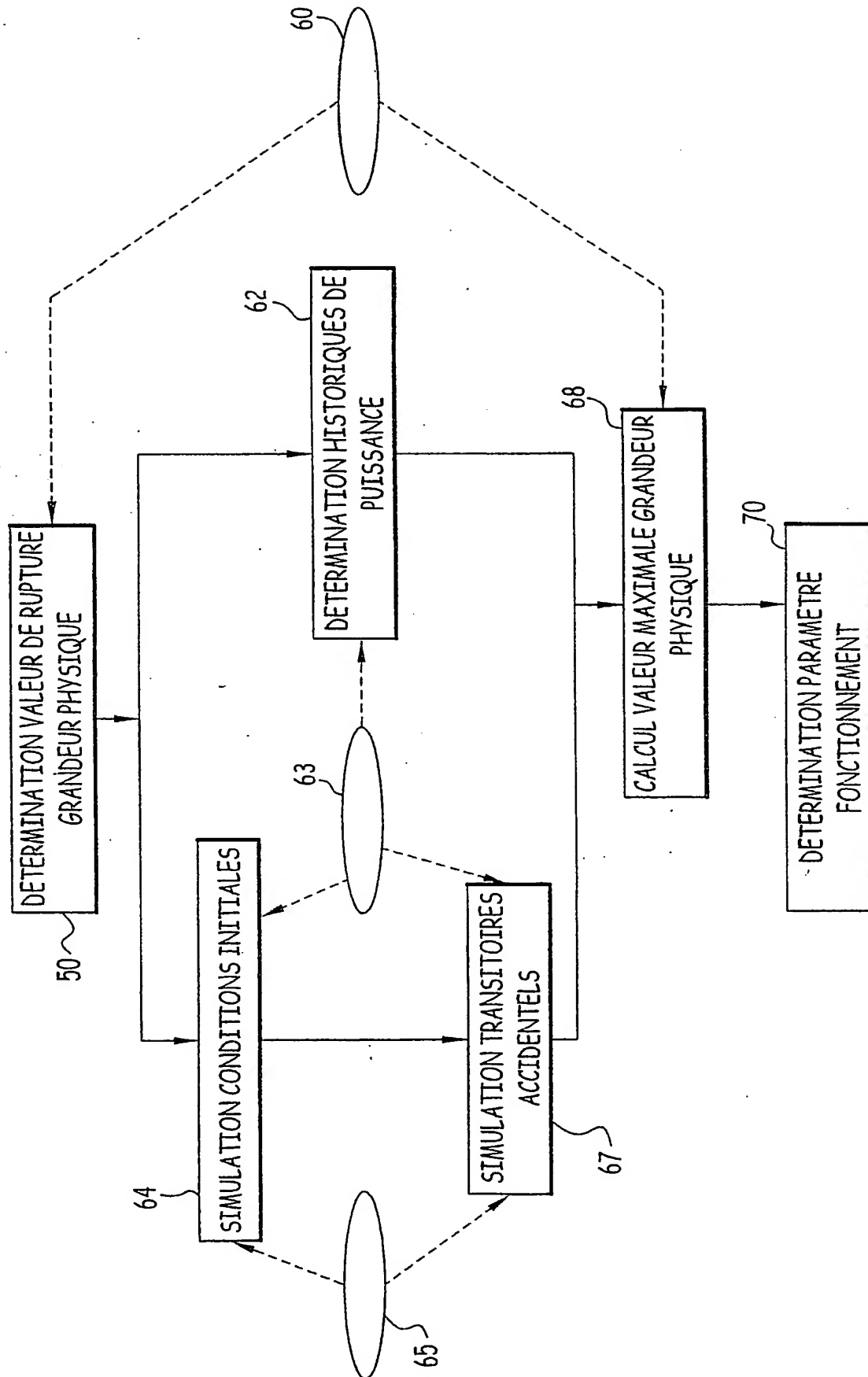


FIG.5

6/11

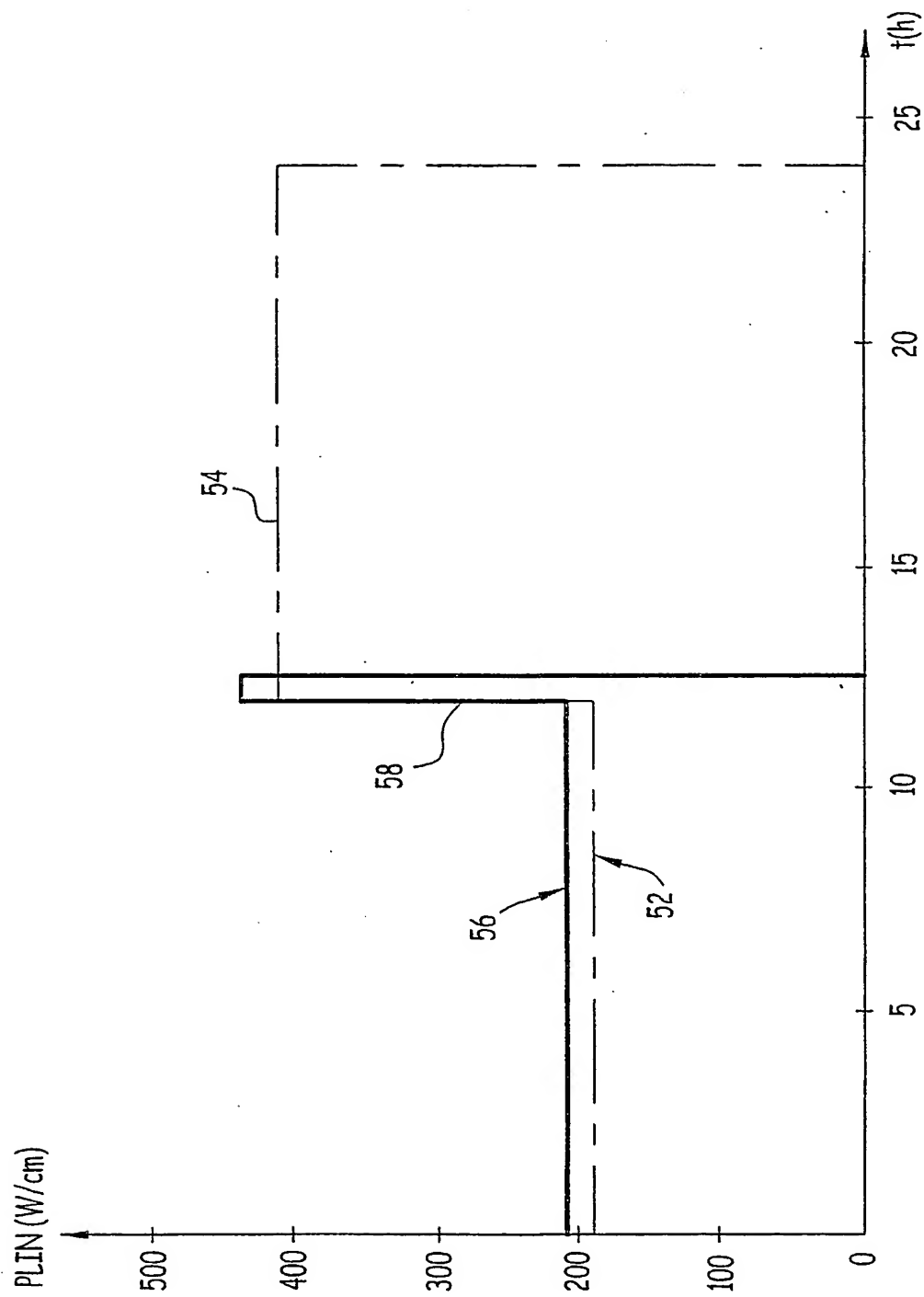


FIG. 6

7/11

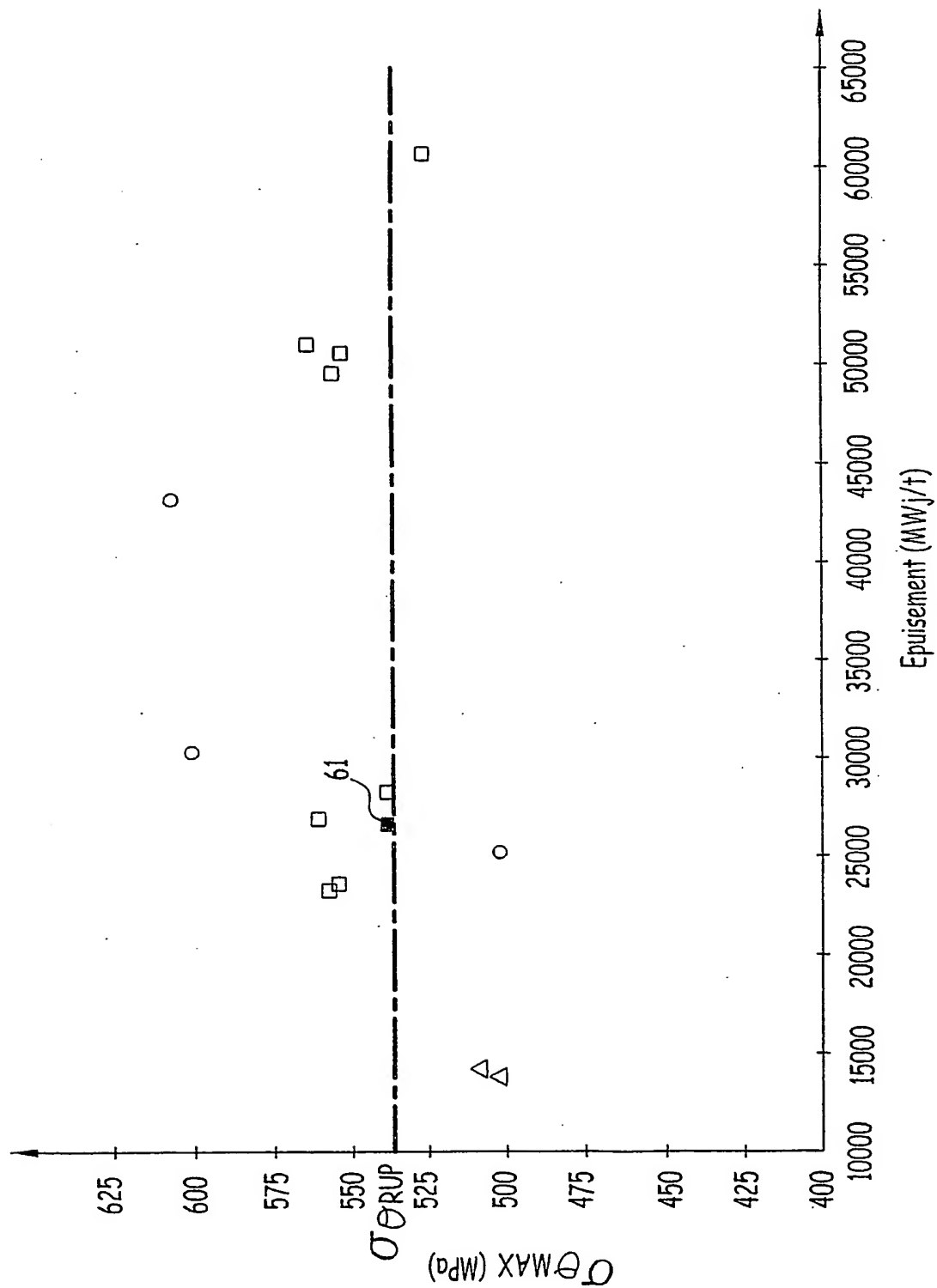
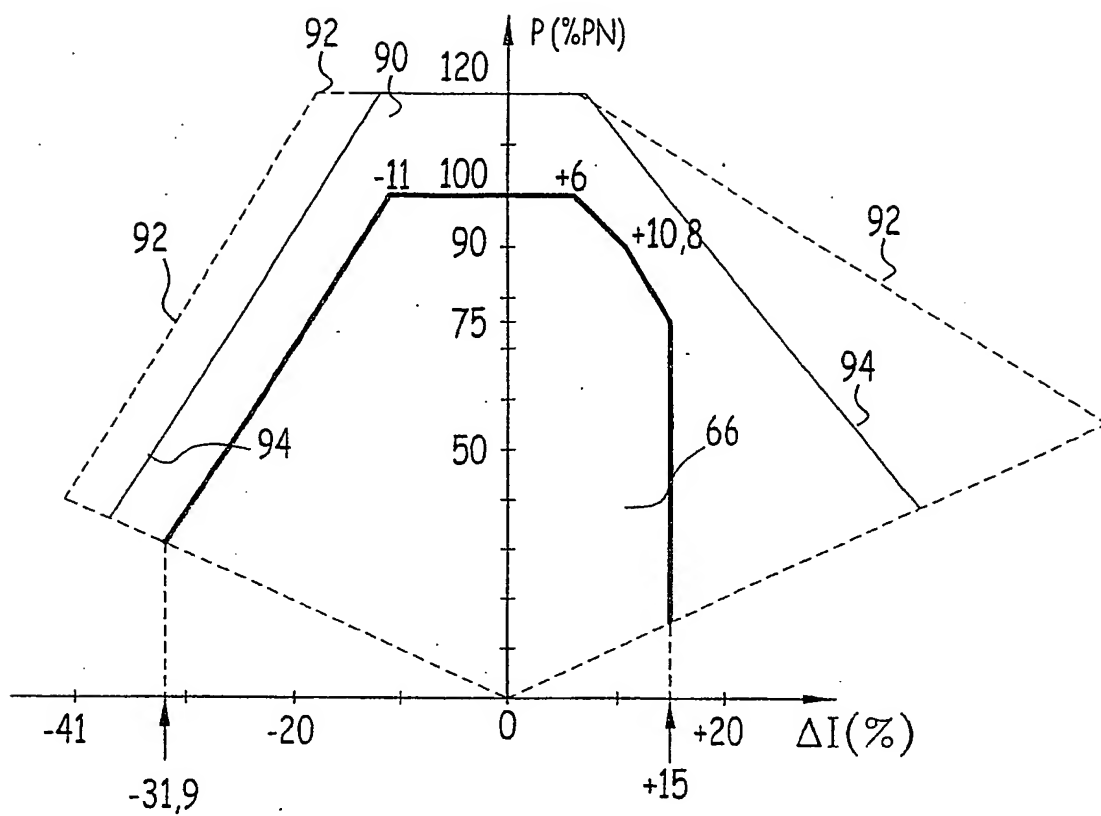


FIG. 7

8/11

FIG.8

9/11

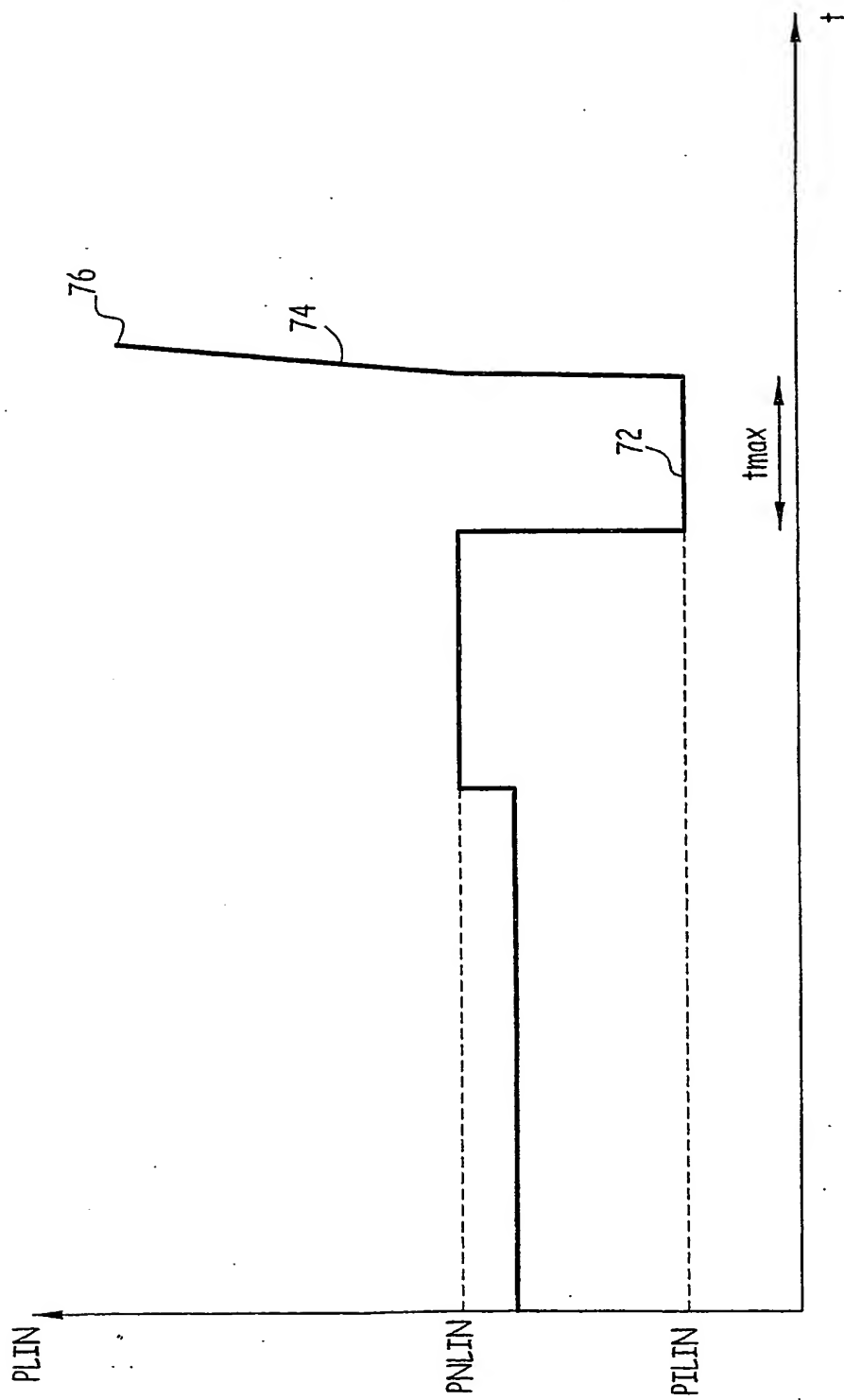


FIG.9



10/11

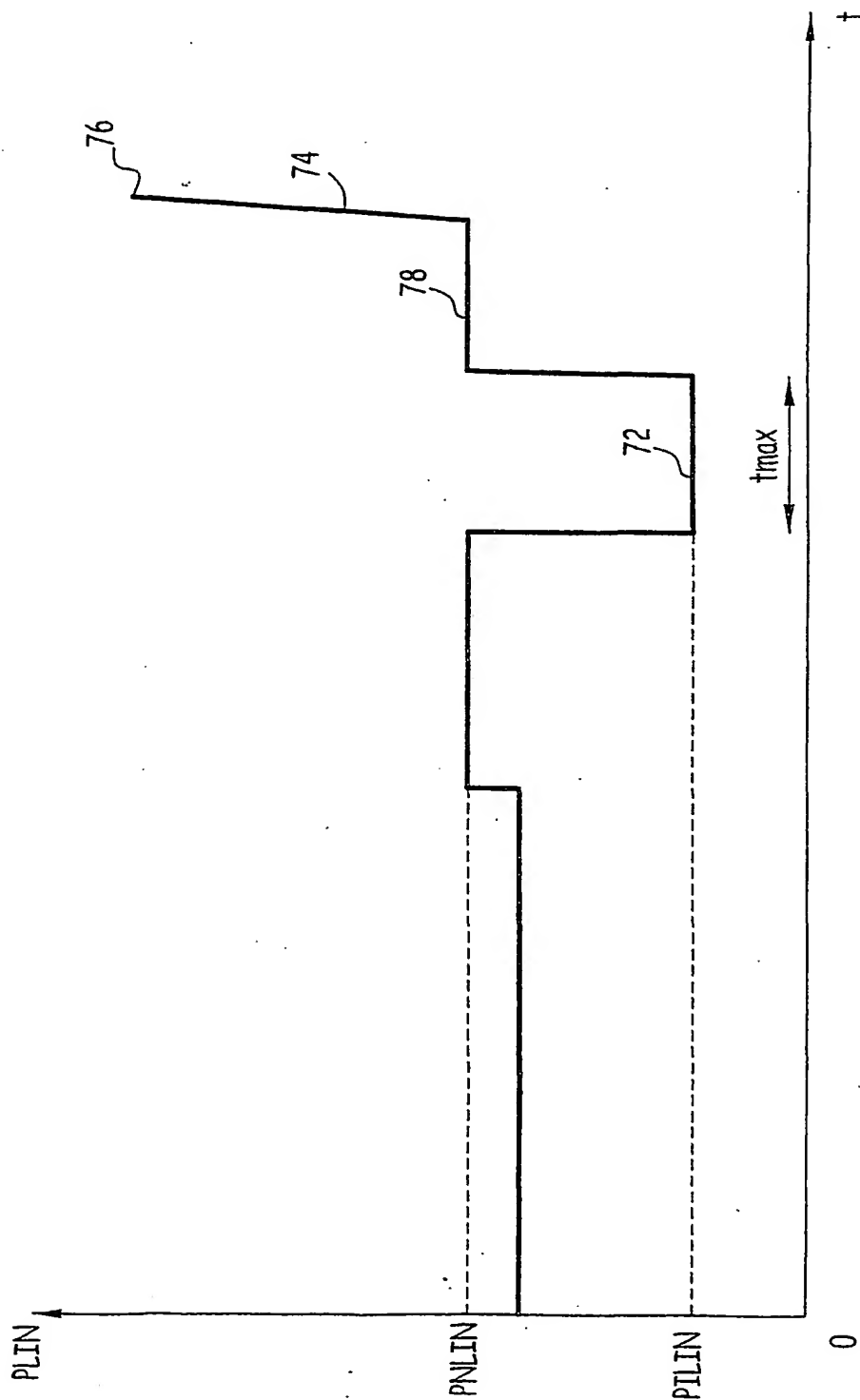


FIG.10

11/11

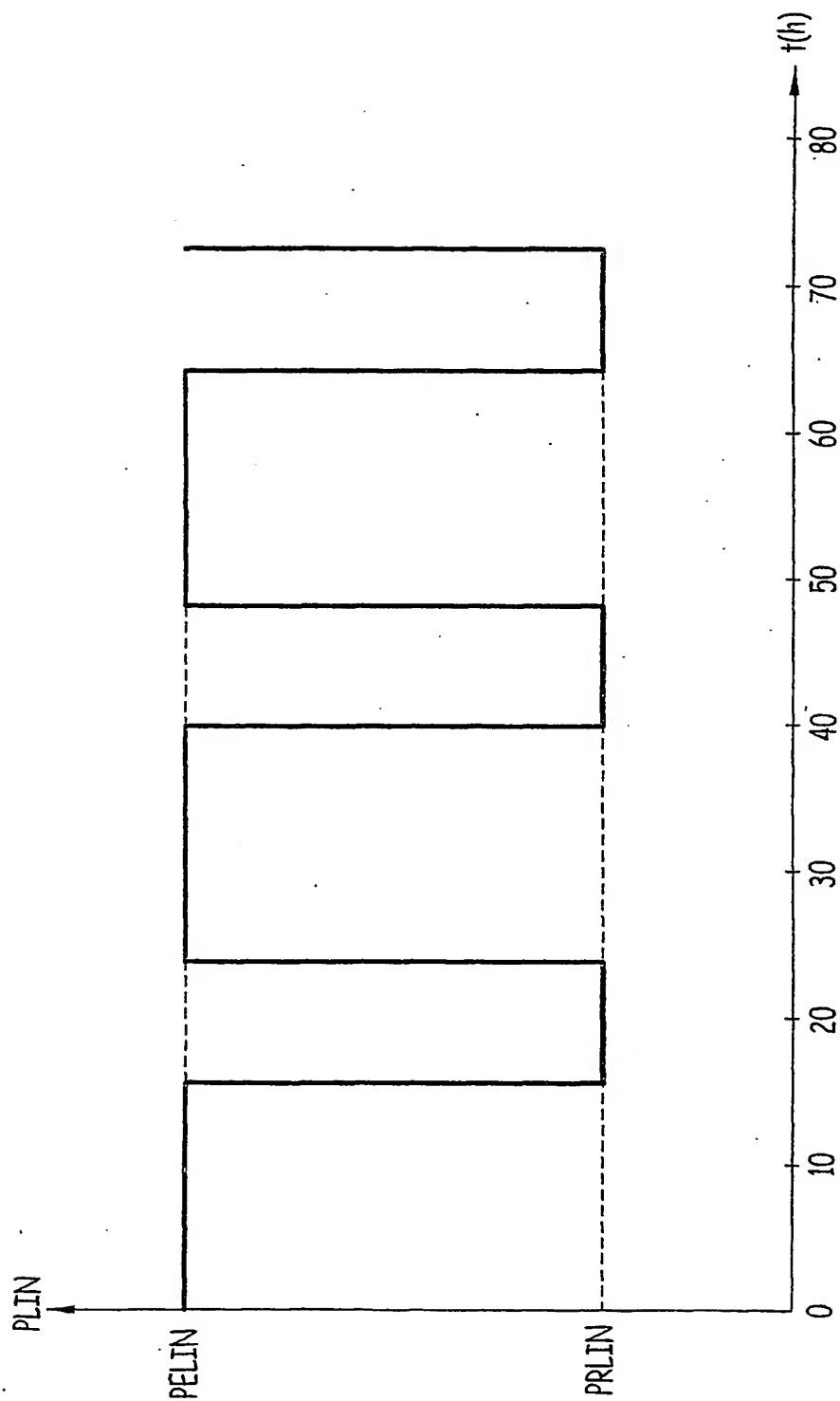


FIG.11

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 03/03016

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
 IPC 7 G21C17/00 G21D3/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
 IPC 7 G21C G21D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

WPI Data, PAJ, EPO-Internal

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 1 113 455 A (GEN ELECTRIC) 4 July 2001 (2001-07-04) the whole document	1-20
A	EP 0 405 863 A (GEN ELECTRIC) 2 January 1991 (1991-01-02) abstract	1-20
A	EP 1 221 701 A (GLOBAL NUCLEAR FUEL AMERICAS L) 10 July 2002 (2002-07-10) claims 1-10	1-20
A	US 5 912 933 A (ANDERSEN JENS G M ET AL) 15 June 1999 (1999-06-15) claims 1-20	1-20
	--/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*Z\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 February 2004

Date of mailing of the international search report

05/03/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Deroubaix, P

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/FR 03/03016

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>US 4 330 367 A (MUSICK CHARLES R) 18 May 1982 (1982-05-18) claims 1-8</p> <p>-----</p>	1-20

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/JP 03/03016

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 1113455	A	04-07-2001	US 6535568 B1 EP 1113455 A1 JP 2001296382 A TW 473737 B	18-03-2003 04-07-2001 26-10-2001 21-01-2002
EP 0405863	A	02-01-1991	US 5091139 A DE 69022305 D1 DE 69022305 T2 EP 0405863 A2 ES 2078946 T3 JP 2038822 C JP 3065693 A JP 7069451 B	25-02-1992 19-10-1995 04-04-1996 02-01-1991 01-01-1996 28-03-1996 20-03-1991 31-07-1995
EP 1221701	A	10-07-2002	US 2002122521 A1 EP 1221701 A1 JP 2002257973 A US 2003002613 A1	05-09-2002 10-07-2002 11-09-2002 02-01-2003
US 5912933	A	15-06-1999	NONE	
US 4330367	A	18-05-1982	CA 1017077 A1 GB 1476939 A	06-09-1977 16-06-1977

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

P R 03/03016

**A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE**  
CIB 7 G21C17/00 G21D3/00

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

**B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE**

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G21C G21D

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

WPI Data, PAJ, EPO-Internal

**C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS**

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP 1 113 455 A (GEN ELECTRIC) 4 juillet 2001 (2001-07-04) 1e document en entier	1-20
A	EP 0 405 863 A (GEN ELECTRIC) 2 janvier 1991 (1991-01-02) abrégé	1-20
A	EP 1 221 701 A (GLOBAL NUCLEAR FUEL AMERICAS L) 10 juillet 2002 (2002-07-10) revendications 1-10	1-20
A	US 5 912 933 A (ANDERSEN JENS G M ET AL) 15 juin 1999 (1999-06-15) revendications 1-20	1-20
	-/--	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

\* Catégories spéciales de documents cités:

- \*A\* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- \*E\* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- \*L\* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- \*O\* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- \*P\* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- \*T\* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- \*X\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- \*Y\* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- \*Z\* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

20 février 2004

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

05/03/2004

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Deroubaix, P

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/ISA/210 R 03/03016

## C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>US 4 330 367 A (MUSICK CHARLES R)  18 mai 1982 (1982-05-18)  revendications 1-8</p>	1-20

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No

PCT/JP 03/03016

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 1113455	A	04-07-2001	US 6535568 B1 EP 1113455 A1 JP 2001296382 A TW 473737 B	18-03-2003 04-07-2001 26-10-2001 21-01-2002
EP 0405863	A	02-01-1991	US 5091139 A DE 69022305 D1 DE 69022305 T2 EP 0405863 A2 ES 2078946 T3 JP 2038822 C JP 3065693 A JP 7069451 B	25-02-1992 19-10-1995 04-04-1996 02-01-1991 01-01-1996 28-03-1996 20-03-1991 31-07-1995
EP 1221701	A	10-07-2002	US 2002122521 A1 EP 1221701 A1 JP 2002257973 A US 2003002613 A1	05-09-2002 10-07-2002 11-09-2002 02-01-2003
US 5912933	A	15-06-1999	AUCUN	
US 4330367	A	18-05-1982	CA 1017077 A1 GB 1476939 A	06-09-1977 16-06-1977